

迭代重建光学传递函数测量法中多幅图像的相对平移校准

浦东^{1,2,3}, 刘诚^{1,2}, 陶华^{1,2}, 戈亚萍^{1,2}, 朱健强^{1,2*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

²中国科学院中国工程物理研究院高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

³中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 在迭代重建光学传递函数(OTF)测量法中,采集了多幅图像并进行更新计算,因而其具有抗噪声鲁棒性强和抗混叠等优点。然而,在图像采集过程中,不可避免的振动会引起多幅图像之间存在微小的相对平移,进而导致迭代计算次数增加和调制传递函数(MTF)测量结果准确性下降。该测量方法采集到的图像为随机排布的多个点扩散函数(PSF),多幅图像之间无法应用相位相关法来计算相对平移。鉴于此,提出了一种基于相位传递函数(PTF)的多幅图像相对平移校准方法。将每一幅图像单次计算的PTF分别减去第一幅图像单次计算的PTF,根据该差值校准多幅图像之间的相对平移。数值仿真和实验研究结果表明,所提方法的计算精度与图像相对平移的大小无关,至多能够将迭代次数减少80%,并将MTF测量的均方误差降低1~2个数量级。

关键词 测量; 光学传递函数; 调制传递函数; 相位传递函数; 相位相关法; 光学测量

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1912002

Relative Translation Calibration of Multi-Frame Images in Iterative Reconstruction Method for Optical Transfer Function Measurement

Pu Dong^{1,2,3}, Liu Cheng^{1,2}, Tao Hua^{1,2}, Ge Yaping^{1,2}, Zhu Jianqiang^{1,2*}

¹Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, China Academy of Engineering Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract In the iterative reconstruction method for optical transfer function (OTF) measurement, several images are captured and taken into update computation, which offers this method strong anti-noise robustness and anti-aliasing. However, in image acquisition, the inevitable vibration will cause a small relative translation between multi-frame images, which results in an increase in the number of iterations and a decrease in the measurement accuracy of the modulation transfer function (MTF). Moreover, the images captured by this method are randomly distributed point spread functions (PSFs), and the relative translation between multi-frame images cannot be calculated by the phase correlation method. In view of this, a calibration method for relative translation between multi-frame images is proposed, which is based on the phase transfer function (PTF). The PTF calculated by a single iteration of the first image is subtracted from the PTF calculated by a single iteration of each image, and the relative translation between multi-frame images is calibrated according to the difference. The numerical simulation and experimental results reveal that the calculation accuracy of the proposed method is independent of the relative translation between images, and the proposed method can reduce the

收稿日期: 2022-03-01; 修回日期: 2022-03-22; 录用日期: 2022-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(61827816, 11875308, 61905261)、上海市“科技创新行动计划”项目(19142202600)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20180024)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目(XDA25020306)、中国科学院国际合作局对外合作重点项目(181231KYSB20170022)

通信作者: *jqzhu@siom.ac.cn

number of iterations by up to 80% and the mean square error of MTF measurement by one to two orders of magnitude.

Key words measurement; optical transfer function; modulation transfer function; phase transfer function; phase correlation method; optical measurement

1 引言

光学传递函数(OTF)的振幅,即调制传递函数(MTF)因具有定量、客观地反映光学系统成像质量的能力,成为各类成像镜头质量检测的最终判定指标,尤其是随着计算机运算能力的飞速发展和光学测量技术精度的不断提升,数字化的MTF测量技术被广泛应用于高端手机镜头和机器视觉镜头的像质检测中^[1-2]。现有的MTF测量方法依据目标靶的类型分为星点法、狭缝法和刃边法^[3-5],其中通过星点法得到的点扩散函数(PSF)即是待测光学透镜(LUT)OTF的二维傅里叶变换^[6],具有一次测量获取全部频谱方向MTF结果的优点。受制于实际器件的性能指标,星点法的实际应用中存在着空间频率测量范围和信噪比相互制约的问题^[7]。由于实际的小孔具有微米量级的尺寸,在MTF测量中不能看作理想的 δ 函数,故利用其测量空间频率的有效范围为零频到其频谱中的第一零极点。要想扩展空间频率的测量范围,则需要更换更小的小孔,以提高第一零极点的频率。小孔的尺寸越小,其出射的光强度越低,图像传感器像面上的接收能量也就越小,进而导致采集的图像信号受到传感器本身引起的噪声的影响越大,信噪比降低。为了改善这一问题,本课题组之前提出了多幅图像迭代重建测量OTF的方法^[8],通过增加随机排布的点源的数量和采集的图像的数量,在相同尺寸点源的情况下提升了信噪比和抗混叠能力。不同于传统的星点法只采集一幅图像,该方法采集了数幅不同的图像。不可避免的振动会导致每幅图像之间存在着一定的微小相对平移,进而引起迭代计算次数的增加和MTF测量准确性的下降,因此有必要研究并校正相对平移。

在现有的诸多图像配准方法中,相位相关法对平移的测量精度可达0.05 pixel^[9-12],且其理论计算精度与图像平移的大小无关^[13-14]。相位相关法的原理是基于傅里叶变换的平移特性,即当两幅图像只存在平移时,在频率域上体现出一个线性的相位差。在多幅图像迭代重建测量OTF的方法中,采集到的图像为多个随机排布的PSF,每幅图像的PSF排布都不一样,进而无法直接采用相位相关法计算平移。

针对上述问题,本文提出了基于相位传递函数(PTF)的相对平移校准方法。迭代重建算法中单次计算出的PTF是频域中的相位信息,包含光学像差和每幅图像与对应物体图样平移的线性相位差^[15]。在进行所有图像的迭代计算前,单次计算每幅图像与对应物体图样的PTF,将每一幅图像单次计算的PTF分别减去第一幅图像单次计算的PTF,该差值即为每一幅图像与第一幅图像的线性相位差,该相位差对应两幅图像之间的相对平移。利用每一幅图像频谱的相位减去对应的

相位差即可校准多幅图像之间的相对平移,并采用数值仿真和实验验证了所提方法的精确性和可靠性。

2 相对平移校正基本原理

2.1 多帧图像迭代重建测量光学传递函数的原理

当利用星点法测量OTF时,单个针孔采集的单幅图像对于高分辨率的成像镜头来说信噪比低,测量结果易受图像传感器的噪声影响。一般认为噪声可以等同为高斯白噪声^[16-17],则通过平均效应,即提高针孔的数量和采集图像的数量,就可减弱噪声的影响。当同时有多个针孔时,物体的频谱相当于多个针孔频谱的叠加,某些空间频率会出现0值点或近似0值的点,直接采用除法会导致测量结果出现偏差。因此,针对 n 幅多PSF的图像,采用的更新公式为

$$M_{\text{OTF}_i} = M_{\text{OTF}_{i-1}} + \frac{O_n^*}{|O_n|_{\max}} \times \frac{|O_n|}{|O_n|^2 + \alpha} (I_n - O_n \times M_{\text{OTF}_{i-1}}), \quad (1)$$

式中: $M_{\text{OTF}_{i-1}}$ 为第 $i-1$ 次迭代时的OTF; M_{OTF_i} 为第 i 次迭代时的OTF; I_n 为图像的频谱; O_n 为物体图样的频谱; O_n^* 为 O_n 的共轭; α 为1,作用是避免分母出现0,在 M_{OTF_i} 取得全局最小值后,式(1)中括号内的项等于0,故 α 不会影响最终的计算结果; i 表示单次计算次数,每遍历1次 n 幅图像称为1次迭代次数。

实验中采用单色发光二极管(LED)照明数字微镜器件(DMD),通过设计的物体图样控制单个微镜的偏转,将微镜阵列形成的数个点光源作为目标靶,目标靶经过准直镜、LUT和显微物镜后,由电荷耦合器件(CCD)采集对应的图像。将物体图样和对应图像的傅里叶变换代入式(1)中计算出二维OTF的复振幅。实验装置如图1(a)所示,计算过程如图1(b)所示。

图1(b)中 F_{ER} 为误差函数,等于 $1 - F_{\text{SSIM}}(M_{\text{MTF}}, M_{\text{MTF}_{i-1}})$,其中 $F_{\text{SSIM}}(\cdot)$ 是结构相似度函数, M_{MTF_i} 为第 i 次迭代时的MTF, $M_{\text{MTF}_{i-1}}$ 为第 $i-1$ 次迭代时的MTF。由于在迭代计算中无需进行傅里叶变换和光场传输,故多帧图像的迭代计算相比相干光的迭代重建具有计算速度快的优点。

2.2 相位传递函数与相对平移校准

在之前的研究^[8]中,已经分析了光强不均匀、目标靶尺寸误差、CCD量化位数和点数量等静态因素对测量结果的影响。在实际的测量过程中,光学信号与采样网格的相对位置是随机的,以单个PSF为例,即PSF的中心点并不会恰巧在像素点的正中心。因此,采样图像与理想图像之间存在一个随机的平移关系,对图像1来说记为 D 。若没有振动,则所有采样图像与理想信号之间的相对平移均是 D ,所有图像的平移大小一致就不会影响计算的结果。实际上微小的振动

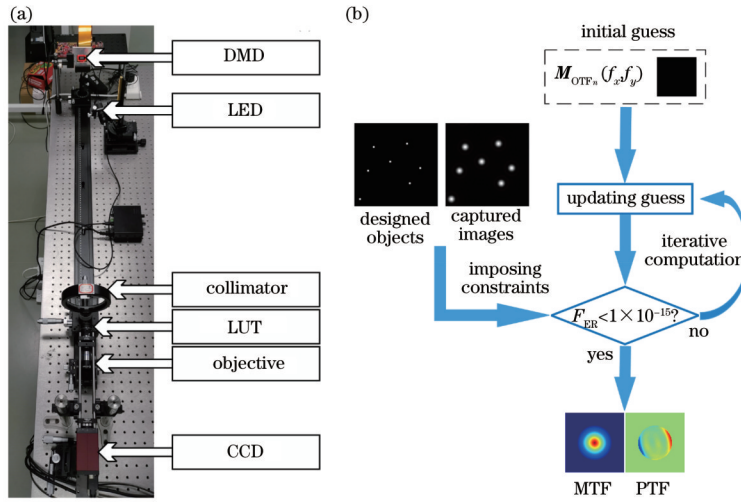


图1 基于多帧图像的迭代计算重建测量OTF的方法。(a)实验装置图;(b)流程示意图

Fig. 1 Iterative reconstruction method for measurement of OTF based on multi-frame images. (a) Experiment setup; (b) process schematic

在40倍物镜的放大下也会产生影响,造成每幅图像之间在x-y面上存在亚像素的相对平移。图像2相对图像1的相对平移记为 S_2 ,图像3相对图像1的相对平移记为 S_3 ,以此类推,此时的位置示意图如图2(a)所示,其中圆点0表示理想的位置,圆点1~3分别表示图像

1~3的位置,可以看出点1相对理想点0有一个整体的平移 D ,点2和点3相对点1有相对平移 S_2 和 S_3 。相对平移校准即将点2和点3平移到点1的位置,校准后的示意图如图2(b)所示。可以发现,校正后点1~3的位置相同,都只有同样的整体平移 D 。

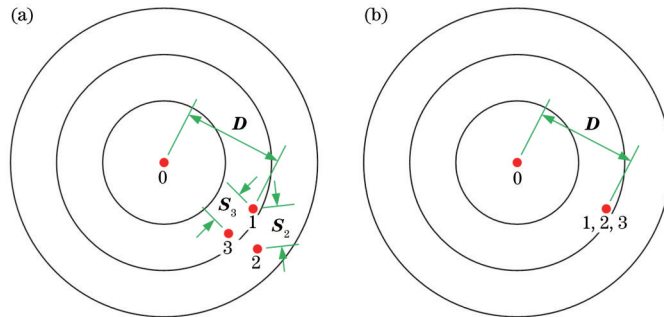


图2 点1~3相对理想0点的平移示意图。(a)未校正的情况;(b)校正后的情况

Fig. 2 Schematic diagram for relative translations of points 1-3 to ideal point 0. (a) Uncorrected condition; (b) corrected condition

根据傅里叶变换的性质,空域中平移 (x_0, y_0) 个像素,在频域 (u, v) 对应的相位为 $2\pi i(x_0 u + y_0 v)$,可表征为一个倾斜的平面。PTF是OTF的相位,第 n 幅图

像计算的 M_{PTF_n} 包含了像差导致的 M_{PTF_n} 、平移 $D=(x_D, y_D)$ 导致的 $2\pi i(x_D u + y_D v)$ 和平移 $S_n=(x_{S_n}, y_{S_n})$ 导致的 $2\pi i(x_{S_n} u + y_{S_n} v)$ 。N幅图像对应的PTF为

$$M_{PTF_n} = \begin{cases} M_{PTF_1} + 2\pi i(x_D u + y_D v), & n = 1 \\ M_{PTF_1} + 2\pi i(x_D u + y_D v) + 2\pi i(x_{S_n} u + y_{S_n} v), & n = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

第 n 幅图像计算的 M_{PTF_n} 可以在迭代计算前根据更新公式单次计算得到。将 $M_{OTF_{i-1}}$ 初始化为全0矩阵,则式(1)可简化为

$$M_{PTF_n} = \arg \left(\frac{O_n^* \times |O_n| I_n}{|O_n|^2 + \alpha} \right), \quad (3)$$

从而可计算出每一幅图像对应的PTF,其中 $\arg(\cdot)$ 为变

元函数。将第2~N幅图像单次计算的PTF减去第1幅图像单次计算的PTF,得到的差值为 $2\pi i(x_{S_n} u + y_{S_n} v)$,该值即为每一幅图像与第1幅图像的相对平移导致的线性相位差。根据

$$I_n = I_n \times \exp[-2\pi i(x_{S_n} u + y_{S_n} v)], \quad (4)$$

对采集的第2~N幅图像的频谱乘以 $2\pi i(x_{S_n} u + y_{S_n} v)$,

相当于在空域对第 2~ N 幅图像平移 $(-x_s, -y_s)$, 消去了第 2~ N 幅图像与第 1 幅图像之间的相对平移, 再进行后续的迭代计算, 避免了图像之间相对平移对迭代计算的影响。相比相位相关法, 在此过程中并不需要对图像进行傅里叶逆变换就可得到平移量 (x_0, y_0) , 也就避免了在图片平移并非整数像素时相位相关法求解平移量具体数值时的精度要求和相应的插值所带来的高计算量问题。虽然保留了整体的平移 D , 但是对 MTF 的测量计算没有影响。

3 数值仿真与实验

参考实验参数建立了一个成像模型, 设定波长为 630 nm, 并采用 F 数为 2 的衍射极限理想 LUT, 模拟研究单次计算的精度和存在像差时相较不校准的情况校准后的提升效果。

3.1 相位单次计算精度

为了验证根据式(3)单次计算得到的相位差的准确性, 模拟无像差时在 x 方向和 y 方向上均为给定像素大小的平移下, 计算得到的 M_{PTF} 与理想 $2\pi i(x_D u + y_D v)$ 相位之间的均方误差 (MSE)。进行 3 次模拟仿真测试, 每次随机生成的物体图样和对应的图像不同, 每

次测试中设置 5 种大小不同的相对平移, 计算出的均方误差如表 1 所示。

表 1 衍射极限下计算出的 PTF 与理想相位之间的均方误差
Table 1 Mean square error between calculated PTF and ideal phase under diffraction limit

Relative translation / pixel	MSE / 10^{-4}		
	First simulation	Second simulation	Third simulation
0.001	0.7172	0.4317	0.6842
0.010	0.7172	0.4317	0.6842
0.100	0.7172	0.4317	0.6842
0.500	0.7172	0.4317	0.6842
1.234	0.7172	0.4317	0.6842

从表 1 可以看出, 无论相对位移的大小是 0.001 pixel, 还是 1.234 pixel, 在同一次测试中都是一样的均方误差, 即计算精度与图像的平移大小无关。因为两种方法的本质都是依靠傅里叶变换的平移性质, 所以所提方法的这一特性与相位相关法一致。相对平移为 1.234 pixel 时的理想相位和计算出的 PTF 如图 3 所示。

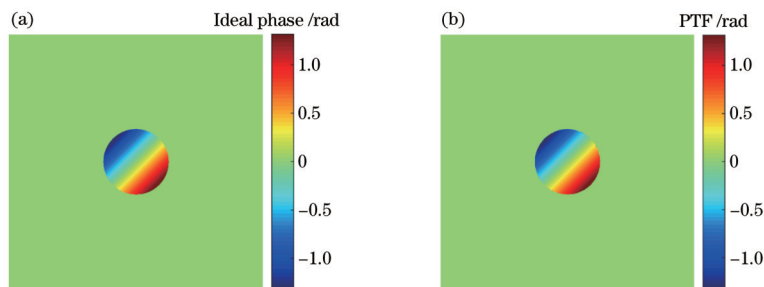


图 3 截止频率内 x, y 方向上的平移均为 1.234 pixel 时的相位。(a) 理想结果; (b) 单次计算的 PTF 结果

Fig. 3 Phase with 1.234 pixel translation in both x and y directions within cutoff frequency. (a) Ideal result; (b) PTF result after iterating once

3.2 存在像差时校准的提升效果

在实际情况下, 待测透镜是达不到衍射极限的水平, 进而必然存在像差。非对称的奇数项像差如慧差会引起 PTF 的畸变, 使得 PTF 中存在 M_{PTF} 项。因此, 在数值仿真中, 在波前中添加系数为 1 的 Zernike 多项式中 $Z_3^{(1)}$ 项的慧差畸变, 此时的相位如图 4(a) 所示。设置两幅图像具有不同的随机位移, 分别计算其 PTF。

从图 4 可以看出, 第 1 幅图像与第 2 幅图像的平移相位不同, 计算出的 PTF 也不同, 其 PTF 相当于慧差导致的 PTF 与平移的相位的叠加, 也就是图 4(c) 相当于图 4(a) 加上图 4(b), 图 4(e) 相当于图 4(d) 加上图 4(e)。

再次设置两幅图像具有不同的随机位移, 分别计算其 PTF, 如图 5(a)、(b) 所示。记录随机位移的相位并计算差值, 得到的理想相位差如图 5(c) 所示。用第 2 幅图像计算出的 PTF 减去第 1 幅图像计算出的

PTF, 结果如图 5(d) 所示。

通过图 5 可以看出, 用第 n 幅图像计算出的 PTF 减去第 1 幅图像计算出的 PTF 可以得出第 n 幅图像与第 1 幅图像之间的平移相位。

为了验证相对平移对迭代重建 OTF 测量法的影响和多幅图像相对平移校准的作用, 采用迭代次数和二维 MTF 的均方误差作为衡量指标。设定每幅图像平移的随机范围分别为 (0.70 ± 0.50) pixel, (0.70 ± 1.00) pixel, (1.00 ± 0.50) pixel, (1.00 ± 1.00) pixel, 即整体的平移为 0.70 pixel 或 1.00 pixel, 相对平移在 $-0.50 \sim 0.50$ pixel 或 $-1.00 \sim 1.00$ pixel 内取随机值。每次以 11 幅不同的图像进行迭代重建 OTF 测量仿真计算, 分别进行相对平移校准和不校准, 得到的结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 进行校准后无论相对平移的范围是多少像素, 迭代计算次数均为个位数, 均方误差在 10^{-8} 量级。在没有校正的情况下, 迭代计算次数在 40

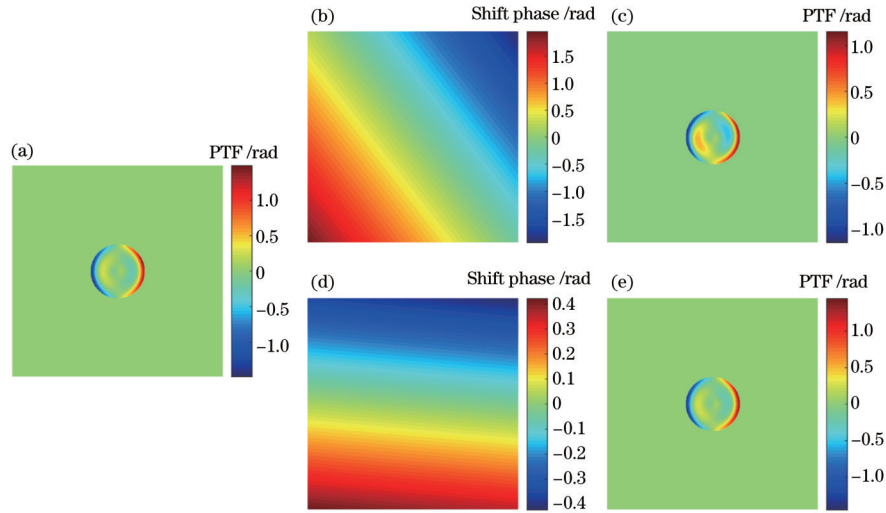


图 4 引入慧差后的仿真相位图。(a)慧差导致的 PTF;(b)第 1 幅图像随机平移的相位;(c)第 1 幅图像单次计算出的 PTF 结果;(d)第 2 幅图像随机平移的相位;(e)第 2 幅图像单次计算出的 PTF 结果

Fig. 4 Simulated phase diagrams after introducing coma aberration. (a) PTF caused by coma aberration; (b) phase of random translation in image 1; (c) PTF result of image 1 after iterating once; (d) phase of random translation in image 2; (e) PTF result of image 2 after iterating once

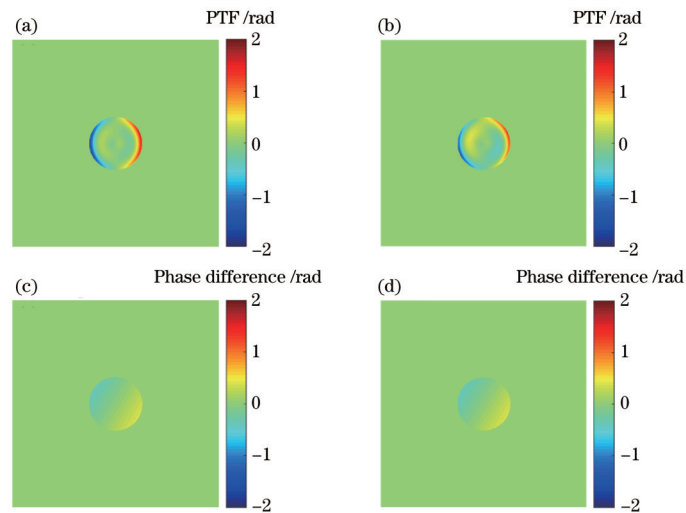


图 5 理论相位差与计算相位差对比。(a)第 1 幅图像单次计算出的 PTF 结果;(b)第 2 幅图像单次计算出的 PTF 结果;(c)第 1 幅图像与第 2 幅图像间理想的平移相位差;(d)第 1 幅图像与第 2 幅图像间计算出的相位差

Fig. 5 Comparison between theoretical phase difference and calculated phase difference. (a) PTF result of image 1 after iterating once; (b) PTF result of image 2 after iterating once; (c) ideal translation phase difference between image 1 and image 2; (d) calculated translation phase difference between image 1 and image 2

次左右,均方误差与随机平移的范围相关:随机平移范围为 $-1.00\sim 1.00$ pixel时均方误差在 10^{-6} 量级;随机平移范围为 $-0.50\sim 0.50$ pixel时均方误差在 10^{-7} 量级。MTF的均方误差和迭代次数与整体平移的大小无关。通过基于PTF的随机平移校正,MTF测量的均方误差可以降低1~2个数量级,迭代次数可减少80%。

3.3 实验验证光学传递函数测量

在光学平台上搭建了如图1(a)所示的实验光路:LED为中心波长为630 nm的远心光源;DMD为Ti公司生产的DLP7000;准直镜焦距为1000 mm,口

径为100 mm;LUT焦距为35 mm, F 数为2;平场显微物镜放大倍率为40倍;CCD的位深度为16 bit,像素尺寸为 $6.5\ \mu\text{m}$ 。设计不同的物体图样和采集对应的图像(各11幅),将进行和不进行相对平移校准的图像代入迭代计算。单幅物体图样的生成算法为循环产生一个随机点,判断该点与所有已有点的距离,若距离大于设定值则保留,小于则舍弃,直至无法再增加点。点与点之间设定的最小距离决定了一幅图像中有多少个点,这就相当于在一个正方形中放置尽可能多的圆,圆心就是点的坐标。此外,距离图样边缘几个像素内的点也要舍弃,以保证采集到的图

表 2 在不同平移量下对相对平移进行校正和不校正对迭代次数和均方误差的影响

Table 2 Effects of correction and non-correction of relative translation on number of iterations and mean square error under different translations

Relative translation /pixel	With correction		Without correction	
	Number of iterations	MSE / 10^{-7}	Number of iterations	MSE / 10^{-7}
0.70 ± 0.50	7	0.6892	39	1.042
0.70 ± 1.00	8	0.8717	39	29.97
1.00 ± 0.50	8	0.8160	43	1.715
1.00 ± 1.00	7	0.9029	42	31.02

像中所有 PSF 均被有效地完整记录,而不存在残缺^[18]。其中 1 幅设计的图样和采集的对应图片如图 6 所示。可以看出,采集到的 PSF 位置随机分布,且相互之间没有交叠。

图 7(a)和图 7(b)分别为迭代重建的二维 MTF 和二维 PTF,进行和不进行相对平移校准时的迭代次数分别为 8 次和 10 次,进行相对平移校准后迭代次数减少了 20%。考虑到实验中实际的振动引起的相对平移像素数较小,故迭代次数上的减少有限。根据 MTF 测量校正原理^[4],对相对平移校准后的迭代计算结果进行校正后的结果如图 7(c)所示。

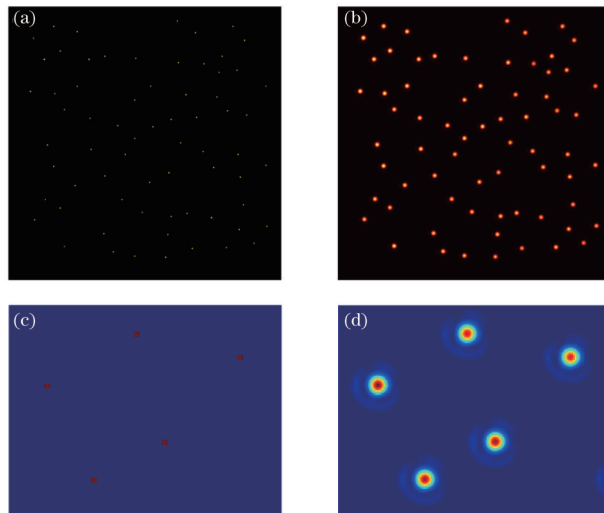


图 6 物体图样和采集到的图像。(a)物体图样之一;(b)与图 6(a)对应的完整图像;(c)物体图样的局部图;(d)与图 6(c)对应的局部图

Fig. 6 Object pattern and captured image. (a) One of object patterns; (b) complete image corresponding to Fig. 6(a); (c) partial picture of object pattern; (d) partial picture corresponding to Fig. 6 (c)

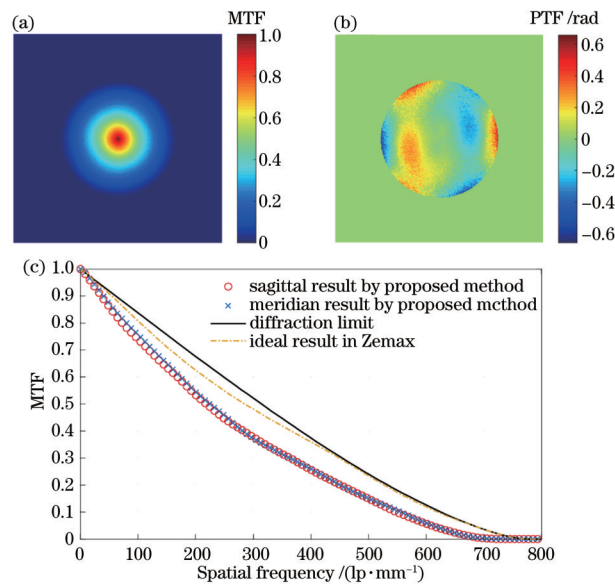


图 7 计算出的 OTF 测量结果。(a)二维 MTF;(b)二维 PTF;(c)校正后的 MTF

Fig. 7 OTF measurement results by calculation. (a) Two-dimensional MTF; (b) two-dimensional PTF; (c) corrected MTF

Zemax 软件的仿真结果为理想情况下的 MTF, 实际情况下 MTF 并不能达到理想值, 存在一定的误差。误差的来源分为测量仪器误差和待测镜头本身的误差。待测镜头本身存在镜片加工误差、装调误差等, 这会导致成像质量低于理想值。测量仪器的误差来源有光路中光学元件的位置误差、CCD 调焦误差和光源的光谱宽度, 通过光谱仪测量 LED 光源, 其光谱的半峰全宽为 15 nm。改进措施包括在 LED 前加上窄带滤光片以提升单色性和采用自动对焦算法控制高精度电机移动 CCD 代替人眼观察与手动平移台来进一步寻找最佳的焦面。

4 结 论

根据傅里叶变换的平移性质, 参考相位相关法, 提出了一种迭代重建光学传递函数测量法, 是一种应用相位传递函数对多幅图像相对位移进行校准的方法。将第 2~N 幅图像单次计算的 PTF 分别减去第 1 幅图像单次计算的 PTF, 得到每一幅图像与第 1 幅图像的相对平移导致的线性相位差, 每一幅图像频谱的相位减去对应的相位差即可校准多幅图像之间的相对平移。所提方法无需计算准确的平移像素数, 其计算精度与图像的平移大小无关。仿真研究结果表明, 所提方法能够将 MTF 测量均方误差降低 1~2 个数量级, 迭代次数减少 80%。虽然实验中的相对平移量较小, 提升效果有限, 但是仍能表明所提方法能够有效解决光学传递函数测量中多幅图像相对平移的问题。在相对平移校准的基础上, 下一步的工作将探索大小一致的采样平移量的提取, 即将 PTF 中的平移分量和像差分量区分开来。

参 考 文 献

- [1] 陈方涵, 赵光宇, 张晓梅, 等. 高分辨率手机镜头精密组装多光轴聚焦镜头设计[J]. 光子学报, 2021, 50(12): 1222001.
Chen F H, Zhao G Y, Zhang X M, et al. Multi-axis focusing lens design for precise assembly of high-resolution mobile phone lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12): 1222001.
- [2] 施龙超. 基于图像处理的镜头 MTF 测试系统的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
Shi L C. Research of lens MTF test system based on image processing[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [3] 徐伟伟, 张黎明, 杨宝云, 等. 光学卫星相机在轨调制传递函数检测方法[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2228001.
Xu W W, Zhang L M, Yang B Y, et al. On-orbit modulation transfer function estimation of optical satellite camera[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2228001.
- [4] 袁理, 张晓辉, 刘振江, 等. 便携式调制传递函数测试仪的研制[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1111001.
Yuan L, Zhang X H, Liu Z J, et al. Developing of portable modulation transfer function tester[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1111001.
- [5] Masaoka K. Edge-based modulation transfer function measurement method using a variable oversampling ratio[J]. Optics Express, 2021, 29(23): 37628-37638.
- [6] Williams C S, Becklund O A. Introduction to the optical transfer function[M]. Bellingham: SPIE Press, 2002.
- [7] Boreman G D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems[M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- [8] Pu D, Pan X C, Tao H, et al. Iterative reconstruction method for the accurate measurement of optical transfer function[J]. Applied Optics, 2021, 60(26): 8164-8173.
- [9] Li Y, Wang J L, Yao K N. Modified phase correlation algorithm for image registration based on pyramid[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(1): 709-718.
- [10] 谢中思, 郭天太, 刘维, 等. 全息中基于多算法融合的相位拼接方法研究[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0709001.
Xie Z S, Guo T T, Liu W, et al. Phase splicing method based on multi-algorithm fusion in holography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0709001.
- [11] 谢俊峰, 莫凡, 王怀, 等. 基于能量对称分布相位相关配准的资源三号 02 星颤振探测[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0628003.
Xie J F, Mo F, Wang H, et al. Jitter detection of ZY3-02 satellite platform using phase-correlation registration based on symmetrical energy distribution[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0628003.
- [12] Wang C W, Ka S M, Chen A. Robust image registration of biological microscopic images[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6050.
- [13] Dai W, Au O C, Zhu W J, et al. A robust interpolation-free approach for sub-pixel accuracy motion estimation [C]//IEEE International Conference on Image Processing, September 15-18, 2013, Melbourne, VIC, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 1767-1771.
- [14] Guizar-Sicairos M, Thurman S T, Fienup J R. Efficient subpixel image registration algorithms[J]. Optics Letters, 2008, 33(2): 156-158.
- [15] Bhakta V R, Somayaji M, Christensen M P. Applications of the phase transfer function of digital incoherent imaging systems[J]. Applied Optics, 2012, 51(4): A17-A26.
- [16] Haefner D P, Burks S D. Noise estimation of an MTF measurement[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8355: 835506.
- [17] 陈丽焯, 饶鹏, 朱含露, 等. 一种用于提高点源法 MTF 检测精度的去噪方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(18): 181001.
Chen L X, Rao P, Zhu H L, et al. Denoising method for improving detection accuracy of point source method by MTF[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(18): 181001.
- [18] Pu D, Tao H, Ge Y P, et al. Improvements on sampling of point spread function in optical transfer function measurement[J]. Optics Express, 2022, 30(7): 10953-10968.